

Optimasi Berat Konstruksi Sekat Melintang Kapal dengan Variasi Penegar Sekat

Alfath Lathiful Ikhwan, M. Nurul Misbah

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, 60111

e-mail: alfathlathiful@gmail.com, mnmisbah@na.its.ac.id

Abstrak—Sekat merupakan salah satu konstruksi di kapal yang secara umum berfungsi sebagai pemisah antara kompartemen atau ruangan di kapal. Menurut aturan konstruksi standar IACS, ada beberapa sekat yang wajib dipasang pada kapal, seperti sekat tubrukan, sekat kamar mesin, dan sekat buritan (*stern tube*). Dalam mendesain konstruksi sekat yang optimal, haruslah dilakukan analisis lebih lanjut menggunakan *direct calculation* untuk mengetahui kekuatan struktur sekat tersebut, untuk selanjutnya dapat diputuskan apakah optimasi masih dapat dilakukan dengan mengecilkan ukuran penegar sekat atau merubah susunan struktur sekat tersebut. Apabila konstruksi sekat optimal, maka berat sekat menjadi minimum, sehingga akan menurunkan biaya produksi juga. Hal ini dapat menguntungkan terutama bagi industri galangan kapal. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan optimasi berat konstruksi sekat melintang. Metode optimasi yang digunakan adalah “*optimization by design trial and error*”, yaitu dengan menentukan variasi dan batasan optimasi dari pertimbangan desainer sendiri. Dalam penentuan variasi dan batasan tersebut, akan berpedoman pada ilmu di bidang teknik perkapalan. Dan untuk *direct calculation* dalam proses optimasi, akan menggunakan metode elemen hingga (FEM) dibantu *software*. Dari hasil penelitian optimasi sekat melintang, didapatkan bahwa variasi struktur sekat melintang yang paling ringan adalah sekat dengan variasi jarak penegar 600 mm, 1 penumpu horizontal, dengan ukuran profil desain *custom*, yaitu seberat 9045,4 kg, dengan tegangan maksimum yang terjadi sebesar 174,6 MPa dan berat yang lebih ringan sebesar 1,47% (134,7 kg) dari konstruksi sekat melintang data asli. Adapun sekat tersebut menggunakan profil *bulb* yang dapat menurunkan berat konstruksi sekat hingga 3,26% lebih ringan jika dibandingkan profil *unequal legs angles* dan 5,96% jika dibandingkan profil *equal legs angles* dengan susunan struktur konstruksi sekat yang sama.

Kata Kunci—Metode Elemen Hingga, Optimasi, Pelat Berpenegar, Sekat, Tegangan.

I. PENDAHULUAN

DALAM proses mendesain kapal, seorang desainer kapal harus mampu mendesain kapal sesuai apa yang dibutuhkan oleh owner dan juga nantinya desain tersebut haruslah memenuhi peraturan konstruksi badan klasifikasi dan peraturan statutori oleh IMO (*International Maritime Organization*) yang menyangkut keselamatan dan keamanan kapal, kargo serta penumpang. Dalam mendesain konstruksi suatu kapal, seorang desainer kapal juga harus mempertimbangkan banyak hal, seperti memastikan agar desain konstruksi yang digunakan memenuhi standar kekuatan konstruksi yang disyaratkan kelas, memastikan agar tidak terjadi *overdesign* pada struktur (desain yang terlalu kuat dan berlebihan pada kapal) dan juga harus mempertimbangkan kemudahan proses produksi komponen kapal tersebut agar harga produksi tetap ekonomis.

Overdesign dihindari dalam mendesain kapal, karena hal ini membuat kapal menjadi lebih berat dan ini menyebabkan kapal menjadi tidak efisien lagi baik dari segi teknis maupun ekonomis. Begitu pula dalam mendesain konstruksi sekat melintang kapal (*transverse watertight bulkhead*), haruslah dibuat seoptimal mungkin. Sekat melintang kapal selain berfungsi sebagai tembok pemisah yang kedap air pada kapal, juga berfungsi untuk menambah kekuatan konstruksi kapal. Oleh karena itu dalam proses optimasi desain struktur sekat, haruslah dianalisa dengan lebih dalam dan menyeluruh lagi tentang persebaran tegangan dan keterkaitannya dengan berat konstruksinya. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan coba dilakukan analisis kekuatan konstruksi pada sekat melintang pada kapal tanker 6500 LT DW (*Long Tonnage Dead Weight*) untuk mendapatkan berat konstruksi yang paling minimum dengan mempertimbangkan aspek tegangan izin dari aturan kelas.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sekat Kapal (*Bulkhead*)

Sekat pada kapal berdasarkan posisinya dapat dibagi menjadi 2, yaitu sekat memanjang (*longitudinal bulkhead*) dan sekat melintang (*transverse bulkhead*). Sekat kapal memiliki 3 fungsi utama, yaitu membagi badan kapal menjadi ruangan-ruangan yang kedap air, menambah kekuatan melintang kapal, dan mencegah menjalarnya api saat terjadi kebakaran. Jika ditinjau dari fungsinya, sekat melintang kapal dapat dibagi menjadi beberapa golongan, yaitu sekat kedap air, sekat kedap minyak, sekat untuk keperluan akomodasi, dan sekat berlubang (*swash bulkhead*) untuk mengatasi *sloshing* dan *free surface effect* muatannya [1].

B. Optimasi Desain Engineering

Dalam desain teknik (*engineering design*), banyak hal yang harus dipertimbangkan selain memastikan bahwa desain tersebut bekerja sesuai fungsinya. Optimasi pada *engineering design* tidak selalu merupakan fungsi minimalisasi, seperti contohnya dalam mendesain robot pengangkat (*lift robot*), kita ingin memaksimalkan beban yang dapat diangkat oleh robot tersebut, sehingga kita gunakan metode optimasi fungsi maksimum.

Adapun dalam proses penelitian ini, metode optimasi yang akan digunakan adalah metode *optimization by design trial and error*. Desainer pertama kali harus menentukan *set of input* yang akan digunakan dalam proses optimisasi yang dirasa akan menghasilkan output yang lebih baik. Adapun *series of input* yang dimaksud adalah berupa *variables*, *objectives*, dan *constraints*. Proses desain dengan metode ini

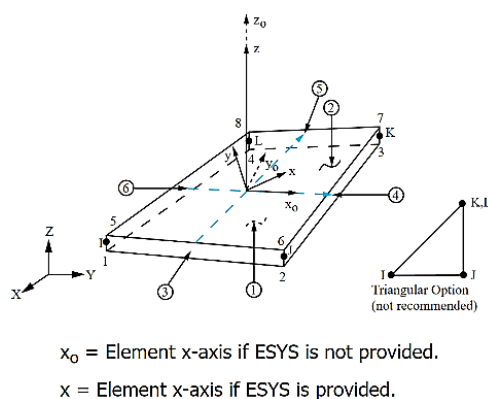
biasanya akan berakhir seiring habisnya waktu atau uang yang dialokasikan untuk desain tersebut [2]. Adapun ukuran penegar dan penumpu pada sekat dapat diturunkan apabila dilakukan *direct calculation* dan masih memenuhi standar kelas[3].

C. Analisis Tegangan dan Berat Sekat Melintang Kapal

Sekat melintang kapal yang dianalisis terdiri dari 2 tipe, yaitu: *transverse flat stiffened bulkhead* dan *transverse corrugated bulkhead*. Adapun variasi yang diberikan untuk *flat stiffened bulkhead* adalah variasi penumpu (dengan atau tanpa penumpu) dan untuk variasi *corrugated bulkhead* adalah dari sudut *corrugated bulkhead*-nya (45° , 55° , 64.36° dan 65°). Dan tegangan terkecil terjadi pada *corrugated bulkhead* sudut 45° dan untuk berat konstruksi minimum adalah *corrugated bulkhead* sudut 64.36° [1]. Namun untuk variasi susunan konstruksi penegar pada *flat stiffened bulkhead* belum dilakukan, dan akan menjadi topik bahasan pada jurnal ini.

D. Metode Elemen Hingga (FEM)

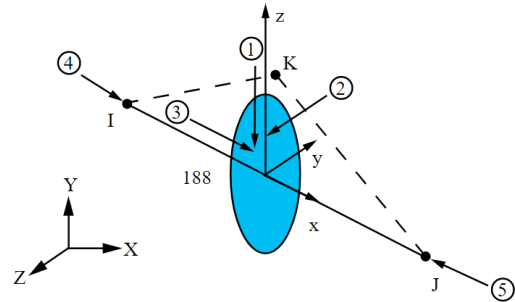
Metode elemen hingga adalah suatu metode numerik perhitungan yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai persoalan mekanika dengan geometri yang kompleks. Persoalan perancangan dapat diselesaikan dengan cara matematis dan numeris. Untuk benda-benda yang mempunyai bentuk yang tidak teratur, penyelesaiannya akan sulit menggunakan cara matematis, sehingga perlu cara baru, yaitu menggunakan cara numerik, yang dalam perkembangannya disebut sebagai metode elemen hingga. Metode elemen hingga membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai elemen hingga. Proses pembagian suatu kontinu menjadi elemen hingga ini dikenal sebagai proses diskretisasi, sehingga elemen hingga merupakan pendekatan bagian demi bagian dengan menggunakan polinomial yang mana masing-masing terdefinisi pada daerah (elemen) yang kecil dan dinyatakan dalam harga-harga titik simpul dari fungsi tersebut[4]. Adapun dalam analisis ini menggunakan model 2 dimensi. Meshing pada elemen pelat menggunakan elemen SHELL dan penegar menggunakan elemen BEAM.



Gambar 1. Elemen SHELL [5]

Elemen SHELL cocok untuk menganalisis struktur *shell* yang memiliki ketebalan tipis hingga sedang. Ini adalah elemen empat *node* dengan enam derajat kebebasan di setiap nodenya: translasi arah x , y , dan z , dan rotasi di sumbu x , y , dan z (dapat dilihat pada Gambar 1). (Jika opsi membran digunakan, elemen tersebut hanya memiliki derajat

kebebasan translasi). Opsi bentuk elemen segitiga degenerasi hanya dapat digunakan sebagai elemen pengisi dalam pembuatan mesh. Elemen SHELL sangat cocok untuk aplikasi linier, rotasi besar, dan/atau non-linier dengan regangan besar. Perubahan ketebalan *shell* dicatat dalam analisis non-linier. Di domain elemen, skema integrasi penuh maupun sebagian didukung oleh elemen ini. Elemen SHELL juga bertanggung jawab atas efek pengikut (*load stiffness*) dari tekanan yang didistribusi[5].

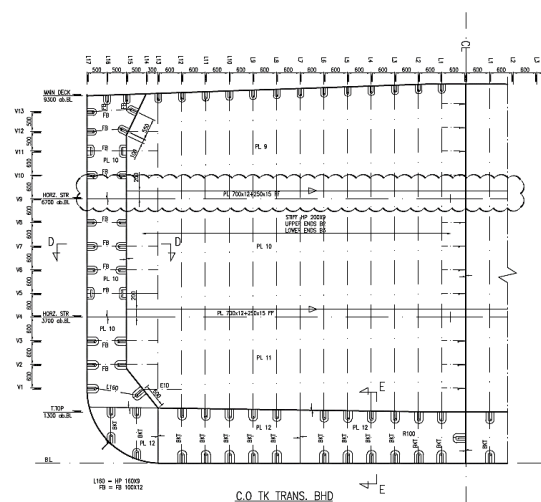


Gambar 2. Elemen BEAM[5]

Elemen BEAM cocok untuk menganalisis struktur balok yang ramping hingga agak tebal. Unsur ini didasarkan pada teori balok Timoshenko yang mencakup efek deformasi geser. Elemen ini memberikan opsi untuk melengkung (*warping*) yang tidak terkendali (*unrestrained*) dan terkendali (*restrained*) sepanjang penampangnya. Elemen ini adalah elemen balok dua *node* linear, kuadrat, atau kubik dalam 3-D. Elemen BEAM memiliki enam atau tujuh derajat kebebasan di setiap *node* (dapat dilihat pada Gambar 2). Ini termasuk translasi di arah x , y , dan z dan rotasi dalam sumbu x , y , dan z . Tingkat ketujuh kebebasan (besarnya *warping*) adalah opsional. Elemen ini sangat cocok untuk aplikasi nonlinear regangan linier, rotasi besar, dan/atau regangan besar[5].

III. PENGUMPULAN DATA

Adapun pada penelitian kasus optimasi bulkhead ini, data asli kapal yang akan digunakan adalah menggunakan data konstruksi Kapal Tanker 6500 LTDW, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Data Konstruksi Sekat Kapal Tanker 6500 LTDW

IV. PERHITUNGAN LOAD CSR UNTUK FEM

Pada direct calculation dengan FEM untuk keperluan optimasi penegar sekat, akan menggunakan load (pembebanan) berupa tekanan statis tangki pada salah satu sisi sekat. Tekanan statis tangki yang terjadi pada kapal tanker disebabkan oleh fluida, yaitu salah satunya oleh muatannya sendiri berupa minyak (*oil*). Adapun dalam melakukan analisis nantinya akan digunakan besaran tekanan statis tangki sesuai peraturan kelas, sebagai berikut :

Nilai untuk *tank testing pressure* diambil dari yang terbesar dari rumus dibawah ini[6]:

$$P_{in-test} = \rho_{sw} g z_{test} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (1)$$

$$P_{in-test} = \rho_{sw} g z_{tk} + P_{valve} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (2)$$

Dimana :

z_{test} : Jarak vertikal dari *load point* ke titik terjauh dari berikut ini, dalam meter:

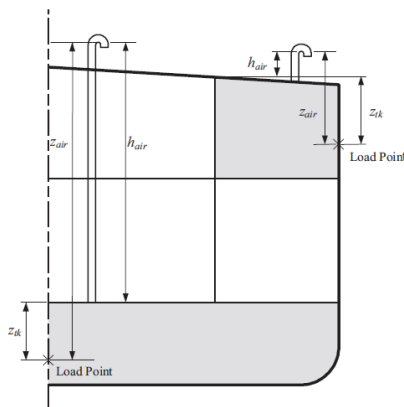
- (a) *Top of overflow*
- (b) 2.4 m diatas *top of tank*

z_{tk} : Jarak vertikal dari titik tertinggi tangki (tidak termasuk *small hatchways*) ke *load point*.

ρ_{sw} : massa jenis air laut, 1.025 tonnes/m³

g : percepatan gravitasi, 9.81 m/s²

P_{valve} : sebesar *pressure relief valve*, tidak kurang dari 25 kN/m²

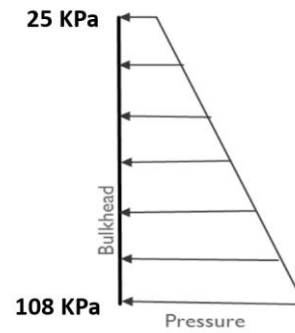


Gambar 4. Jarak z dan h Untuk Perhitungan Beban Statis Tangki

Perhitungan rumus dilakukan berulang untuk mengecek tekanan statis tangki pada dasar tangki dan pada puncak tangki (dapat dilihat pada Tabel 1), untuk selanjutnya dibuat load (pembebanan) berupa fungsi besar terhadap ketinggian berbentuk trapesium, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 1.
Perhitungan Load Beban Tekanan Statis Tangki

Deskripsi	Input
Tekanan Statis Tangki (Pada Dasar Tangki)	
ρ_{sw} (massa jenis air laut)	1,025 ton/m ³
g (percepatan gravitasi)	9,81 m/s ²
z_{test} (dari titik beban ke puncak tangki + 2.4m)	10,7 m
z_{tk} (dari titik beban ke puncak tangki)	8,3 m
P_{valve} (tekanan katup pressure relief min. = 25 KPa)	25 KPa
$P_{in-test}$ (Tekanan statis tangki)	108,46 KPa
Tekanan Statis Tangki (Pada Puncak Tangki)	
ρ_{sw} (massa jenis air laut)	1,025 ton/m ³
g (gravity acceleration)	9,81 m/s ²
z_{test} (from load point to top tank + 2.4m)	2,4 m
z_{tk} (from load point to top tank)	0 m
P_{valve} (pressure relief valve min. = 25 KPa)	25 KPa
$P_{in-test}$ (Static tank testing pressure)	25,0 KPa



Gambar 5. Persebaran Beban Statis Tangki Berbentuk Trapesium

V. OPTIMASI JENIS PROFIL PENEGAR

A. Desain Modulus Penegar Serupa Untuk 3 Variasi Profil

Dalam optimasi jenis profil penegar, akan digunakan ukuran modulus sesuai data asli kapal, untuk selanjutnya dilakukan desain profil penegar dengan besar modulus yang serupa untuk 3 jenis variasi profil, antara lain: Profil *Bulb*, *Unequal Legs Angle Bar* (UAB) dan *Equal Legs Angle Bar* (EAB).

Tabel 2.

Desain Modulus Penegar Sekat Untuk Variasi Jenis Profil		
Jenis Profil	Dimensi Profil	Modulus Penampang
Bulb	HP 200 x 9	77,8 cm ³
UAB	L 180 x 100 x 10	77,8 cm ³
EAB	L 191 x 8	77,8 cm ³

B. Desain Sekat dan Analisis Tegangan dengan FEM

Setelah mendesain profil penegar, selanjutnya perlu dianalisis tegangan yang terjadi pada model sekat untuk tiap variasi jenis profil penegar tersebut. Analisis tegangan dengan FEM dibantu dengan software, yaitu menggunakan load berupa fungsi ketinggian sumbu Y, yang telah dihitung sebelumnya pada Tabel 1. Adapun kondisi batasnya adalah fixed support pada sekeliling sisi model 2D Bulkhead. Untuk pelat dimodelkan dengan elemen SHELL dan penegar dimodelkan dengan elemen BEAM. Untuk material data yang digunakan adalah baja *KA36 mild steel*. Hasilnya adalah seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.

Untuk tegangan ekuivalen yang terjadi harus dipastikan berada dibawah tegangan izin kelas. Adapun tegangan izin yang disyaratkan ClassNK untuk sekat melintang, dihitung menggunakan rumus:

$$\sigma_e = \frac{175}{K} \quad (3)$$

Dimana :

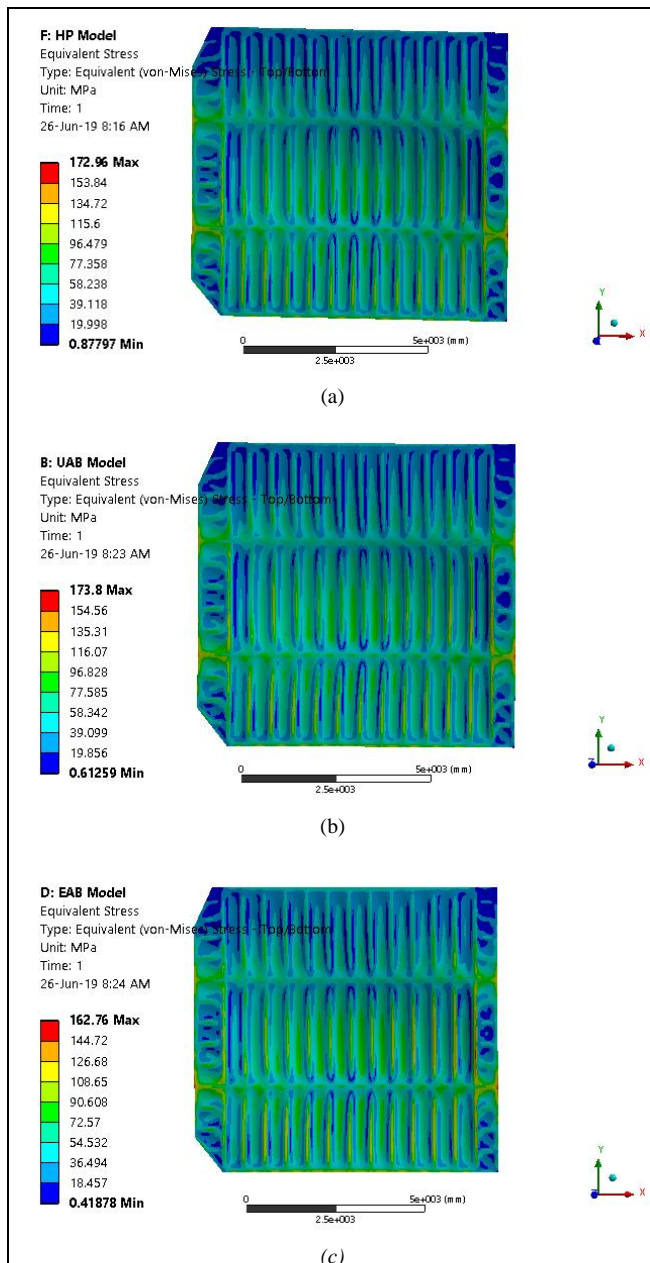
σ_e : *equivalent stress*

K : *Material factor (mild steel = 1)*

Dari ketiga model, seluruhnya memenuhi standar tegangan izin (hasil tegangan dapat dilihat pada Tabel 3), sehingga selanjutnya akan dilakukan perbandingan berat konstruksi sekat, untuk menentukan jenis profil yang paling optimal untuk digunakan dalam sekat melintang.

Tabel 3.

Hasil Analisis Tegangan Ekuivalen Dengan FEM	
Model	Tegangan Ekuivalen
Model Sekat Profil <i>Bulb</i>	172,96 MPa
Model Sekat Profil UAB	173,8 MPa
Model Sekat Profil EAB	162,76 MPa



Gambar 6. Hasil analisis tegangan dengan FEM (a) model dengan profil *bulb*, (b) model dengan profil UAB, dan (c) model dengan profil EAB

C. Perbandingan Berat Sekat

Pada ketiga model yang telah dianalisis tegangan tadi, akan dihitung beratnya modelnya menggunakan *software* FEM yang sama. Hasilnya adalah seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4.
Perbandingan Berat Sekat Melintang

Model	Berat Sekat
Model Sekat Profil <i>Bulb</i>	9180,1 kg
Model Sekat Profil UAB	9490,9 kg
Model Sekat Profil EAB	9762,9 kg

Hasilnya adalah berat sekat yang teringan terdapat pada variasi jenis profil *bulb*, yaitu sebesar 9180,1 kg, sehingga akan digunakan untuk optimasi dengan variasi selanjutnya, yaitu jarak penegar, jumlah penumpu, dan profil desain *custom*/katalog.

VI. OPTIMASI VARIASI JARAK PENEGAR, JUMLAH PENUMPU, DAN DESAIN CUSTOM/KATALOG

A. Penomoran Model

Adapun variasi yang digunakan adalah 5 variasi jarak penegar sekat (600 mm, 650 mm, 700 mm, 750 mm dan 800 mm), 2 variasi jumlah penumpu horizontal sekat (1 dan 2 buah penumpu) dan variasi desain ukuran profil *custom* atau dengan katalog sehingga total model adalah sebanyak 20 model. Berikut adalah penomoran modelnya:

- Model 1.1 (variasi: 600 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 2.1 (variasi: 650 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 3.1 (variasi: 700 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 4.1 (variasi: 750 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 5.1 (variasi: 800 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 6.1 (variasi: 600 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 7.1 (variasi: 650 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 8.1 (variasi: 700 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 9.1 (variasi: 750 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 10.1 (variasi: 800 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil *custom*)
- Model 1.2 (variasi: 600 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 2.2 (variasi: 650 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 3.2 (variasi: 700 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 4.2 (variasi: 750 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 5.2 (variasi: 800 mm, 2 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 6.2 (variasi: 600 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 7.2 (variasi: 650 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 8.2 (variasi: 700 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 9.2 (variasi: 750 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil katalog)
- Model 10.2 (variasi: 800 mm, 1 penumpu horizontal, desain profil katalog)

B. Menghitung Bulkhead Scantlings Dengan Rumus Kelas

Bulkhead Scantlings terdiri dari perhitungan tebal pelat minimum, modulus minimum penegar sekat, dan modulus minimum penumpu sekat. Adapun untuk menghitung tebal pelat minimum sekat digunakan rumus:

Ch 29.2.1 : Tebal dari *structural members* pada *cargo oil tanks* dan *deep tanks* seperti *bulkhead plating*, *floors*, *girders*, *struts* dan *brackets* tidak boleh kurang dari Tabel 5 yang mana disesuaikan dengan panjang kapal.

Tabel 5.
Tebal Minimum

L (m)	Thickness	
	≥	<
105	105	8
120	120	8,5
135	135	9
150	150	9,5
165	165	10
180	180	10,5
195	195	11
225	225	11,5
275	275	12
325	325	12,5
375	375	13
375	375	13,5

Ch 29.4.1 : Tebal untuk *bulkhead plating* tidak boleh kurang dari nilai yang terbesar yang didapat dari perhitungan rumus, dengan mensubstitusikan nilai h , dengan h_1 , h_2 dan h_3 :

$$t = C_1 C_2 S(\sqrt{h}) + 3,5 \text{ (mm)} \quad (4)$$

Dimana :

S : Jarak antar penegar (m)

h_1 : Jarak vertikal dari ujung bawah pelat yang ditinjau hingga ke *top of hatchway*.

h_2 : $0.85(h_1 + \Delta h)$

$$\Delta h = 16/L(l_t - 10) + 0.25(b_t - 10) \text{ (m)} \quad (5)$$

Dimana :

l_t : panjang tangki (m), masukkan 10 meter apabila $l_t < 10$ meter

b_t : lebar tangki (m), masukkan 10 meter apabila $b_t < 10$ meter

h_3 : $0.3\sqrt{L}$

C_1 : Koefisien panjang kapal

Bernilai 1.0, untuk kapal L kurang dari sama dengan 230 m

Bernilai 1.07, untuk kapal L lebih dari sama dengan 430 m

Untuk L diantara dua nilai tersebut, dapat menggunakan interpolasi linear

C_2 : Untuk *transverse bulkhead*

C_2 : $3.6\sqrt{K}$

K : Koefisien sesuai dengan jenis baja yang digunakan (*mild steel* = 1.0)

Tabel 6.
Hasil Desain Tebal Pelat

Model	Tebal Pelat (mm)		
	Lajur 1	Lajur 2	Lajur 3
1-3	11	10	9
4-5	12	11	10
6-8	11	10	9
9-10	12	11	10

Adapun untuk menghitung modulus minimum penegar sekat digunakan rumus:

Ch 29.5.2 *Section modulus Z* dari penegar tidak boleh kurang dari hasil perhitungan dengan rumus berikut:

$$Z = 125 C_1 C_2 C_3 S h l^2 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (6)$$

Dimana:

S : Jarak antar penegar (m)

h : jarak dari *mid-point stiffener* ke *top of hatchway*

C_1 : Koefisien panjang kapal

Bernilai 1,0, untuk kapal L kurang dari sama dengan 230 m

Bernilai 1,07, untuk kapal L lebih dari sama dengan 430 m

Untuk L diantara dua nilai tersebut, dapat menggunakan interpolasi linear

C_2 : K/18 (Untuk *transverse bulkhead*)

C_3 : Ditentukan dari Tabel 7, berdasarkan jenis ujung sambungan:

Tabel 7.
Nilai dari C_3

The other end	One end			
	Rigid fixity by bracket	Soft fixity by bracket	Supported by girders or lug-connection	Snip
Rigid fixity by bracket	0,70	1,15	0,85	1,30
Soft fixity by bracket	1,15	0,85	1,30	1,15
Supported by girders or lug-connection	0,85	1,30	1,00	1,50
Snip	1,30	1,15	1,50	1,50

Catatan:

1. *Rigid fixity by bracket*, berarti terdapat sambungan tetap (*fixed*) antara penegar dengan *double bottom*, atau penegar sebanding pada *planes* atau *bracket* yang berdampingan, atau sambungan tetap lain yang setara.

2. *Soft fixity by bracket*, berarti terdapat sambungan antara *beams, frames*, dll. yang bersilangan posisinya dan *bracket*.

K : Koefisien sesuai dengan jenis baja yang digunakan (*mild steel* = 1.0)

Tabel 8.

Hasil Perhitungan Modulus Minimum Untuk Penegar

Model	Jarak Penegar	Jml. Penumpu	Modulus Minimum
1	600 mm	2	306,2 cm ³
2	650 mm	2	331,7 cm ³
3	700 mm	2	357,2 cm ³
4	750 mm	2	382,7 cm ³
5	800 mm	2	408,3 cm ³
6	600 mm	1	513,7 cm ³
7	650 mm	1	556,5 cm ³
8	700 mm	1	599,3 cm ³
9	750 mm	1	642,1 cm ³
10	800 mm	1	685,0 cm ³

Adapun untuk menghitung modulus minimum penumpu sekat digunakan rumus:

Ch 13.2.6 *Section modulus Z* dari penegar tidak boleh kurang dari hasil perhitungan dengan rumus berikut:

$$Z = 4,75 S h l^2 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (6)$$

Dimana:

S : Lebar area yang didukung oleh *girder*

h : Jarak vertikal dari *midpoint* of l , hingga ke *top of bulkhead* pada *centerline*.

l : Panjang girder, diukur diantara tumpuan *girder* yang berdekatan. Panjang l dapat dimodifikasi sesuai dengan **1.1.16**. Apabila terdapat *brackets* dengan *curved free edges*, panjang lengan efektif *bracket* diperhitungkan sebagai b seperti di Gambar.

Tabel 8.

Hasil Perhitungan Modulus Minimum Untuk Penumpu

Model	Jml. Penumpu	Modulus Penumpu Minimum
1-5	2	3309,5 cm ³
6-10	1	3769,7 cm ³

C. Desain Profil Penegar dan Penumpu Awal

Adapun dilakukan desain awal ukuran profil sementara, untuk kemudian diaplikasikan ke model untuk dilakukan direct calculation dengan FEM, untuk proses optimasi pengecilan modulus penegar. Berikut adalah hasil desain awal ukuran penegar sebelum optimasi:

Tabel 9.
Desain Ukuran Awal Penegar Sekat

Model	Jenis Profil	Dimensi Profil	Modulus Desain
1	Profil Bulb	HP 230 x 11	321,8 cm ³
2	Profil Bulb	HP 240 x 10	358,8 cm ³
3	Profil Bulb	HP 240 x 12	365,1 cm ³
4	Profil Bulb	HP 240 x 13	391,4 cm ³
5	Profil Bulb	HP 260 x 10	417,3 cm ³
6	Profil Bulb	HP 280 x 11	517,1 cm ³
7	Profil Bulb	HP 280 x 13	564,0 cm ³
8	Profil Bulb	HP 300 x 11	611,9 cm ³
9	Profil Bulb	HP 300 x 12	647,7 cm ³
10	Profil Bulb	HP 320 x 12	742,5 cm ³

Dan untuk ukuran profil penumpu horizontal yang didesain adalah sebagai berikut:

Tabel 10.
Desain Ukuran Penumpu Sekat

Model	Dimensi Profil	Modulus Minimum
1-5	T 700x12 + 250x15	3572,76 cm ³
6-10	T 800x12 + 200x15	3774,18 cm ³

D. Direct Calculation FEM dan Optimasi Ukuran Penegar

Pada seluruh model tadi, dilakukan *direct calculation* dengan FEM agar dapat mengetahui tegangan maksimum yang terjadi pada sekat. Hal ini bertujuan untuk keperluan optimasi, dimana penulis menentukan batasan optimasi yaitu dengan batasan tegangan izin yang terjadi pada sekat harus berada direntang 10% dibawah tegangan izin (157,5 MPa – 175 MPa). Apabila tegangan maksimum pada model sekat masih berada diluar rentang tersebut, maka ukuran penegar sekat dianggap masih terlalu kuat, dan masih bisa dikecilkan modulus penegarannya (dioptimasi). Untuk *load* (pembebanan) yang digunakan sama seperti running sebelumnya, yaitu beban tekanan statis tangki, dan kondisi batasnya juga adalah fixed support pada seluruh ujung model sekat. Untuk rekap hasil analisis tegangan dengan FEM dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 11.
Data Rekapitulasi Tegangan

Model	Modulus Desain	Tegangan
1.1	197,8	174,94 MPa
2.1	210,0	172,21 MPa
3.1	222,1	171,53 MPa
4.1	234,2	166,03 MPa
5.1	315,1	174,10 MPa
6.1	279,2	174,69 MPa
7.1	361,8	174,39 MPa
8.1	490,7	174,92 MPa
9.1	603,7	164,62 MPa
10.1	858,4	173,58 MPa
1.2	206,0	172,96 MPa
2.2	218,5	170,18 MPa
3.2	231,0	169,50 MPa
4.2	243,5	163,92 MPa
5.2	326,2	174,06 MPa
6.2	289,5	172,73 MPa
7.2	373,9	173,01 MPa
8.2	512,5	174,54 MPa
9.2	620,6	164,30 MPa
10.2	879,5	173,30 MPa

E. Perbandingan Berat Sekat

Setelah seluruh tegangan memenuhi kriteria optimasi dan tegangan izin oleh kelas, maka selanjutnya akan dibandingkan berat konstruksi sekat seluruh model yang dihitung menggunakan software FEM yang sama. Berikut

pada Tabel 13 disajikan rekapitulasi berat konstruksi sekat tiap model.

Tabel 12.
Rekapitulasi Berat Konstruksi Sekat

Model	Berat Sekat	Rentang Dari Tegangan Izin
1.1	9099,9 kg	0,03%
2.1	9115,7 kg	1,59%
3.1	9149,3 kg	1,98%
4.1	9709,2 kg	5,13%
5.1	9784,3 kg	0,51%
6.1	9045,4 kg	0,18%
7.1	9397,8 kg	0,35%
8.1	9456,3 kg	0,05%
9.1	10235,0 kg	5,93%
10.1	10944,0 kg	0,81%
1.2	9180,1 kg	1,17%
2.2	9192,7 kg	2,75%
3.2	9224,2 kg	3,14%
4.2	9790,5 kg	6,33%
5.2	9856,1 kg	0,54%
6.2	9137,8 kg	1,30%
7.2	9497,4 kg	1,14%
8.2	9549,3 kg	0,26%
9.2	10331,0 kg	6,11%
10.2	11045,0 kg	0,97%

F. Analisis dan Pembahasan Hasil Optimasi

Pada Tabel 13 dapat dilihat rekapitulasi berat konstruksi modal sekat melintang. Untuk model 1.1-10.1 merupakan model dengan desain ukuran penegar secara *custom*, sedangkan untuk model 1.2-10.2, menggunakan ukuran penegar pasaran (katalog). Oleh sebab itu, perbandingan berat akan dipisah antara model 1.1-10.1, dan model 1.2-10.2. Untuk grafik perbandingan berat dapat dilihat pada Gambar 8.

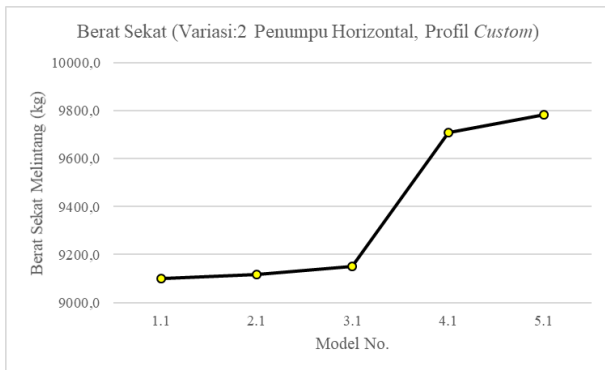
Pada Tabel 13 dapat dilihat juga rentang tegangan yang terjadi pada tiap model terhadap tegangan izin. Dikarenakan batasan optimasi yang digunakan pada penelitian ini adalah tegangan yang terjadi harus berada di rentang 10% dibawah tegangan izin, maka tegangan yang terjadi dapat bervariasi asalkan berada di rentang yang sudah ditetapkan. Hal ini dapat digunakan sebagai informasi tambahan untuk tolok ukur tingkat optimasi yang digunakan pada tiap model. Semakin kecil rentang terhadap tegangan izin, maka optimasi yang dilakukan semakin bagus, dan berat konstruksi sekatnya semakin ringan pula. Jika diamati lebih dalam, pada model 1.1-10.1, untuk sekat melintang terdapat pada model 6.1 dengan rentang tegangan izin sebesar 0,18%, sedangkan rentang tegangan izin yang terkecil terdapat pada model 1.1 yaitu sebesar 0,03%. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun rentang tegangan dari tegangan izin menentukan tingkat optimasi berat sekat, namun hal ini bukanlah faktor utama, melainkan hanya salah satu faktor pertimbangan.

Pada Gambar 7, dapat dilihat bahwa untuk model dengan variasi 2 buah penumpu horizontal sekat dan profil desain *custom*, berat sekat mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya jarak penegar.

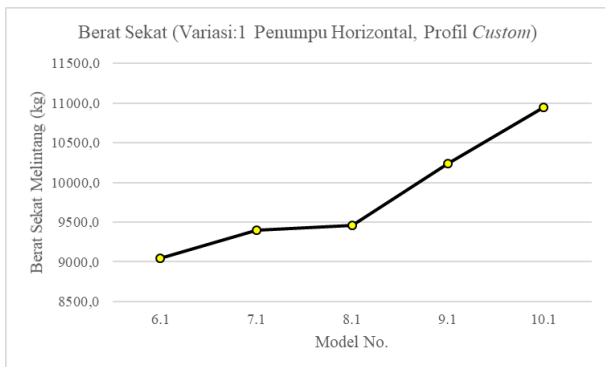
Adapun berat sekat mengalami kenaikan secara drastis pada model dari jarak penegar dari model 700 mm ke 750 mm, dengan kenaikan berat sebesar 559,9 kg. Model sekat teringan terdapat pada model 1.1, dengan variasi jarak 600 mm, yaitu sebesar 9099,9 kg.

Pada Gambar 8, dapat dilihat bahwa untuk model dengan variasi 1 buah penumpu horizontal sekat dan profil desain *custom*, berat sekat mengalami kenaikan seiring dengan

bertambahnya jarak penegar, dengan kenaikan berat terbesar yaitu sebesar 778,7 kg. Model sekat teringan terdapat pada model 6.1, dengan variasi jarak 600 mm, yaitu sebesar 9045,4 kg. Adapun jika dibandingkan secara keseluruhan dengan model 1.1-5.1 yang menggunakan variasi 2 penumpu horizontal, model sekat melintang teringan tetaplah berada pada model 6.1, namun model dengan variasi 1 penumpu horizontal sekat, tidaklah selalu lebih ringan jika dibandingkan dengan model dengan variasi 2 penumpu horizontal sekat dengan jarak penegar yang sama.

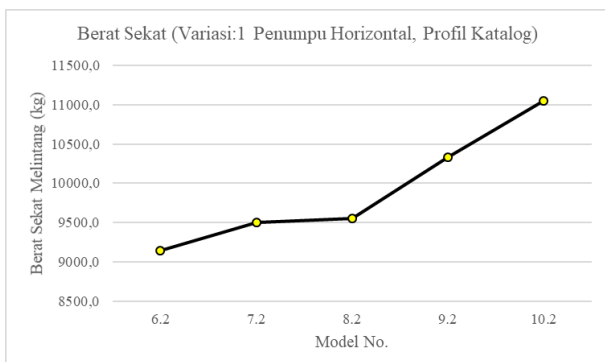


Gambar 7. Grafik Berat Sekat Untuk Model 1.1 – 5.1



Gambar 8. Grafik Berat Sekat Untuk Model 6.1 – 10.1

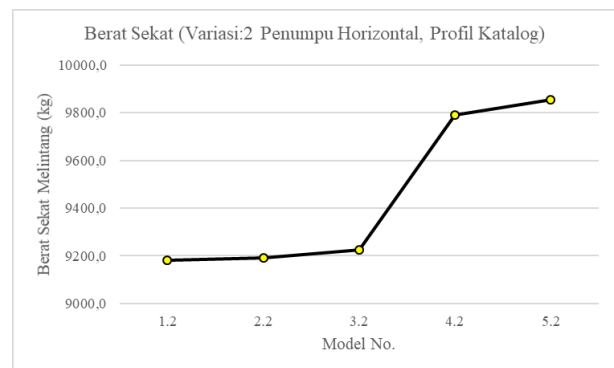
Hal ini dapat dilihat pada model 5.1 jika dibandingkan dengan model 10.1, terlihat bahwa model 10.1 dengan variasi 1 penumpu sekat jauh lebih berat daripada model 5.1 dengan 2 penumpu horizontal sekat yaitu sebesar 1159,7 kg. Adapun untuk model dengan variasi profil katalog, grafik berat sekatnya hampir sama seperti model dengan desain, karena pada dasarnya profil katalog dipilih yang ukuran modulus profilnya mendekati nilai modulus profil desain *custom*. Pada Gambar 9, dapat dilihat bahwa untuk model dengan variasi 2 buah penumpu horizontal sekat dan profil desain katalog, berat sekat mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya jarak penegar.



Gambar 9. Grafik Berat Sekat Untuk Model 1.2 – 5.2

Adapun kenaikan berat sekat paling besar terjadi pada kenaikan jarak penegar dari model 700 mm ke 750 mm, dengan kenaikan berat sebesar 566,3 kg. Model sekat teringan terdapat pada model 1.2, dengan variasi jarak 600 mm, yaitu sebesar 9180,1 kg.

Pada Gambar 10, dapat dilihat bahwa untuk model dengan variasi 1 buah penumpu horizontal sekat dan profil desain katalog, berat sekat mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya jarak penegar, dengan kenaikan berat terbesar yaitu sebesar 778,7 kg. Model sekat teringan terdapat pada model 6.2, dengan variasi jarak 600 mm, yaitu sebesar 9137,8 kg. Adapun jika dibandingkan secara keseluruhan dengan model 1.2-5.2 yang menggunakan variasi 2 penumpu horizontal, model sekat melintang teringan tetaplah berada pada model 6.2, namun model dengan variasi 1 penumpu horizontal sekat, tidaklah selalu lebih ringan jika dibandingkan dengan model dengan variasi 2 penumpu horizontal sekat dengan jarak penegar yang sama. Hal ini dapat dilihat pada model 5.2 jika dibandingkan dengan model 10.2, terlihat bahwa model 10.1 dengan variasi 1 penumpu sekat jauh lebih berat daripada model 5.2 dengan 2 penumpu horizontal sekat yaitu sebesar 1188,9 kg.



Gambar 10. Grafik Berat Sekat Untuk Model 6.2 – 10.2

Jika dibandingkan antara sekat dengan menggunakan profil desain custom dan profil pasaran, hasilnya tentu lebih ringan profil desain custom, karena didesain seoptimal mungkin tanpa mempertimbangkan ukuran umum yang biasa dijual di pasaran. Sehingga, untuk sekat model 1.1-10.1 tentu jauh lebih ringan daripada sekat model 1.2-10.2, dan untuk model sekat teringan dari seluruh model adalah model 6.1, yaitu sebesar 9045,4 kg.

VII. KESIMPULAN

Variasi jenis profil penegar yang paling ringan untuk digunakan sebagai penegar sekat melintang adalah jenis profil *bulb*, yang menghasilkan berat konstruksi sekat sebesar 9180,1 kg, yang lebih ringan dari variasi lain yaitu sekat dengan profil penegar *Unequal Legs Angle Bar* (sebesar 3,26% lebih ringan) dan sekat dengan profil penegar *Equal Legs Angle Bar* (sebesar 5,96% lebih ringan).

Untuk sekat melintang dengan variasi jarak penegar, penumpu horizontal dan desain profil *custom* dan katalog, berat konstruksi sekat minimum terdapat pada model sekat melintang ukuran profil *custom*, dengan variasi jarak penegar 600 mm dan 1 penumpu horizontal, yaitu sebesar 9045,4 kg, lebih ringan sebesar 1,47% (134,7 kg) dari model sekat melintang data asli kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ardianus, S. H. Sujiatanti, and D. Setyawan, "Analisa Kekuatan Konstruksi Sekat Melintang Kapal Tanker dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 2, pp. 186–192, 2018.
- [2] A. R. Parkinson, R. J. Balling, and J. D. Hedengren, *Optimization Methods for Engineering Design - Applications and Theory*. 2013.
- [3] ClassNK, *Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part C*. Japan: ClassNK, 2018.
- [4] R. d. Cook, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th ed. Madison: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [5] SHARCNET, "Element Help," 2016. [Online]. Available: www.sharcnet.ca. [Accessed: 11-Jun-2019].
- [6] IACS, *Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part CSR-T*. Japan: ClassNK, 2018.